

Исследование динамических характеристик каркаса здания методом конечных элементов

УДК 624.04

Кравченко Галина Михайловна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Тронин Дмитрий Ильич

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: troninne@mail.ru

Гунба Аслан Едикович

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: gunbaaslan@mail.ru

Статья получена: 18.11.2018. Рассмотрена: 21.11.2018. Одобрена: 31.11.2018. Опубликовано онлайн: 26.03.2019. ©РИОР

Аннотация. В статье выполнено исследование динамических характеристик каркаса здания методом конечных элементов, используя способ регулирования жесткости системы. Получен спектр частот и форм собственных колебаний каркаса здания. Определена пульсационная составляющая ветровой нагрузки по двум главным осям здания и выполнен статический расчет с учетом этой нагрузки. Различные варианты моделирования каркаса отличались толщиной плит перекрытий и диафрагм жесткости. Варьирование геометрических характеристик элементов каркаса здания позволило выбрать оптимальный вариант конструктивной схемы.

Уровень динамической комфортности оценен по результатам анализа ускорения верхнего этажа каркаса.

Ключевые слова: метод конечных элементов, динамический расчет, частоты колебаний, формы колебаний, динамическая комфортность, пульсационная составляющая ветровой нагрузки.

Динамические нагрузки вносят существенный вклад в напряженно-деформированное состояние несущих конструкций зданий. Динамические характеристики влияют на выбор методов и параметров расчета динамических нагрузок. Результаты динамических расчетов учитыва-

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE BUILDING FRAME

Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: Galina.907@mail.ru

Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Dmitry Tronin

Master's Degree Student, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: troninne@mail.ru

Aslan Gunba

Master's Degree Student, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: gunbaaslan@mail.ru

Manuscript received: 18.11.2018. **Revised:** 21.11.2018. **Accepted:** 31.11.2018. **Published online:** 26.03.2019. ©РИОР

Abstract. The article considers dynamic characteristics analysis of the building frame using stiffness adjusting method. The frequency spectrum and natural vibration forms of the building were obtained. Dynamic wind effect of wind load applied to the building is obtained as well as a static wind load component. A number of finite element models of the structure with different slabs and walls thicknesses were analyzed. Geometric feature variations method allowed to choose the optimal set among a number of possible geometric parameters for the structure. Based on the results for accelerations on the upper floors dynamic comfort criteria were verified.

Keywords: finite element method, dynamic analysis, oscillation frequency, mode shape, dynamic comfort criteria, dynamic wind effect.

ют при принятии конструктивных решений зданий [1].

Динамические воздействия снижают комфортное пребывание людей на верхних этажах. Основной величиной, характеризующей комфортность пребывания людей в помещениях многоэтажных зданий, является ускорение конструкций верхних этажей [2; 3].

При расчете ускорений от ветровой нагрузки исследуются нормативные значения пульсационной составляющей:

$$w_c = 0,7w_p,$$

где w_p — нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Максимальное ускорение этажа здания при выполнении требования комфортности не должно превышать величины:

$$a_{c,max} = 0,08 \text{ м/с}^2,$$

где $a_{c,max}$ — сумма максимальных ускорений по всем основным формам колебаний.

Для исследования главных форм колебаний многоэтажного здания разработана конструктивная схема в виде монолитного железобетонного каркаса.

Расчетная модель разработана в программном комплексе «САПФИР 2015» и экспортирована в программный комплекс «ЛИРА САПР 2013» (рис. 1).

В расчетной схеме учтены: фундаментная плита толщиной 1000 мм, плиты перекрытия толщиной 230 мм, колонны сечением 400 × 400 мм, диафрагмы жесткости толщиной 200 мм, стены подвала толщиной 400 мм. Для всех несущих конструкций принят класс бетона В25 (рис. 2).

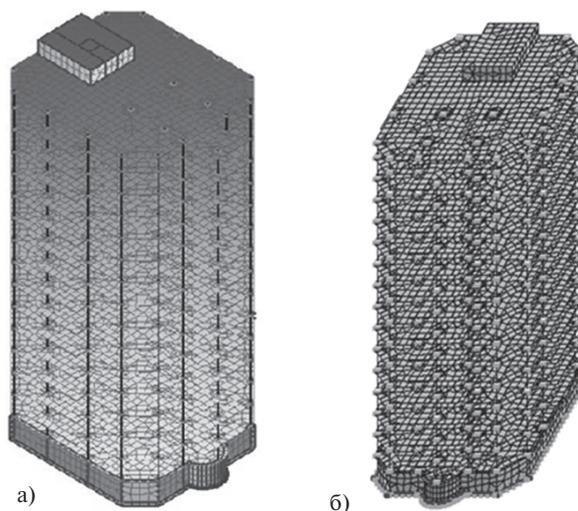


Рис. 1. Расчетная модель: а) в ПК «САПФИР 2015»; б) в ПК «ЛИРА САПР 2013»

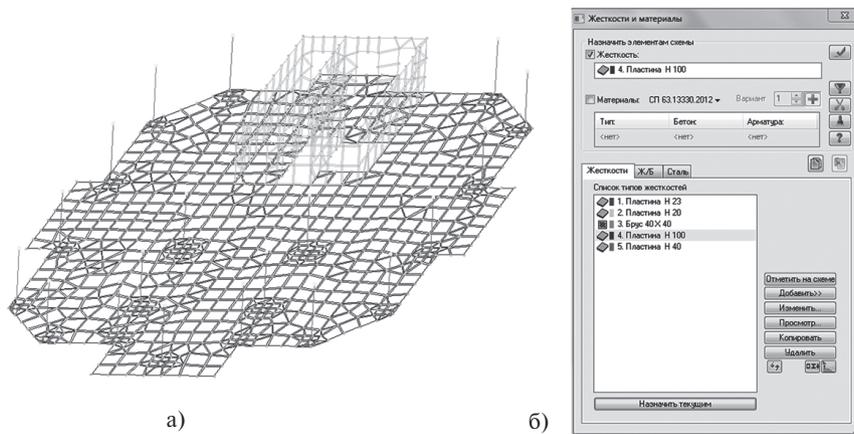


Рис. 2. Жесткости конечно-элементной модели: а) жестких конструкций типового этажа; б) таблица жесткостей

Таблица 1

Частоты собственных колебаний

№ формы	W	f	T	Модальная масса	Сумма модальных масс
	рад/с	Гц	с	%	%
1	4,129	0,657	1,522	23,122	23,122
2	5,183	0,825	1,212	20,393	43,515
3	6,749	1,074	0,931	0,749	44,265
4	14,375	2,288	0,437	4,221	48,486
5	21,945	3,493	0,286	1,655	50,141
6	22,944	3,652	0,274	8,166	58,307
7	23,983	3,817	0,262	15,271	73,578
8	25,446	4,050	0,247	0,053	73,631
9	25,874	4,118	0,243	0,137	73,768
10	28,739	4,574	0,219	0,772	74,540
11	32,699	5,204	0,192	0,000	74,541
12	33,693	5,362	0,186	0,323	74,864
13	33,730	5,368	0,186	0,1677	5,032
14	36,105	5,746	0,174	2,4687	7,499
15	38,963	6,201	0,161	0,0547	7,553
16	41,494	6,604	0,151	0,3307	7,883
17	42,137	6,706	0,149	0,3167	8,199
18	42,206	6,717	0,149	0,4417	8,640
19	44,198	7,034	0,142	0,2287	8,868
20	44,854	7,139	0,140	1,7008	0,568

При создании пространственной плитно-стержневой конечно-элементной модели колонны аппроксимированы стержневыми конечными элементами с шестью степенями свободы в каждом узле. При моделировании фундаментной плиты, стен подвала, диафрагм жесткости и плит перекрытия приняты пластинчатые конечные элементы с шестью степенями свободы в узлах. Грунтовое основание для динамических расчетов каркаса здания принято жестким.

Согласно требованиям в расчетную схему включены следующие нагрузки: постоянные от веса несущих и ненесущих конструкций, временные длительные нагрузки, полезные нагрузки, снеговая нагрузка с учетом снеговых мешков, ветровая нагрузка.

Статическая составляющая ветровой нагрузки задана с приложением по оси X и по оси Y в программном комплексе «САПФИР 2015». Учтены III ветровой район с нормативным значением ветровой нагрузки 38 кг/м^2 , тип местности — В (городские территории).

Для анализа частот и форм собственных колебаний каркаса здания выполнен модальный анализ. После перевода статических загружений в массы выполнен модальный анализ [4–5].

Согласно требованиям СП 14.13330.2016 «Строительство в сейсмических районах» число форм собственных колебаний, учитываемых в расчете, назначается так, чтобы сумма модальных масс составляла не менее 90% от общей массы системы. В динамическом расчете должны быть учтены формы собственных колебаний, эффективная модальная масса которых превышает 5%.

В результате расчета получено, что модальные массы в сумме дают более 90% при учете не менее 176 форм. При этом первые 20 форм дают сумму модальных масс 80%, вклад каждой последующей формы составляет менее 1%.

В табл. 1 приведены частоты и периоды форм собственных колебаний.

Предельное значение частоты собственных колебаний для III ветрового района составляет $f_1 = 1,2 \text{ Гц}$. Согласно полученным результатам модального анализа при расчете пульсационной составляющей ветровой нагрузки необходимо учесть только первые 3 собственные формы колебаний [6–8].

Формы собственных колебаний показаны на рис. 3.

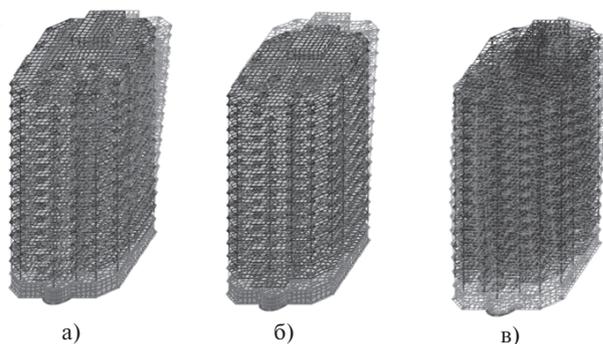


Рис. 3. Формы собственных колебаний: а) 1-я форма, б) 2-я форма, в) 3-я форма

Характер главных форм колебаний соответствует поступательной первой, второй формам и крутильной третьей.

Динамическая ветровая нагрузка формируется на основе исходных данных для расчета пульсационной составляющей ветровой на-

грузки, включающих как основные характеристики (количество учитываемых форм колебаний, матрица масс), так и дополнительные параметры (ветровой район, габариты здания, тип местности, логарифмический декремент колебаний, направление ветра по отношению к обдуваемой поверхности) (рис. 4).

Определена пульсационная составляющая ветровой нагрузки по двум главным осям здания, и выполнен статический расчет с учетом этой нагрузки.

Получено напряженно-деформированное состояние каркаса здания от загрузки пульсационной составляющей ветровой нагрузки (рис. 5). Максимальное горизонтальное перемещение от пульсационной составляющей ве-

тровый нагрузки составило 14,9 мм, что не превышает допустимых значений [9].

Для определения динамической комфортности выполнен анализ ускорений узлов расчетной схемы (рис. 6).

В результате расчета максимальное ускорение плиты перекрытия верхнего этажа составило $a_c = 74,4 \text{ мм/с}^2$, что не превышает нормативного допустимого значения.

В рамках исследования выполнено варьирование геометрических характеристик элементов каркаса здания. Регулирование динамических характеристик способом изменения геометрической жесткости позволяет выбрать оптимальный вариант конструктивной схемы. Варианты моделирования каркаса отличаются толщиной

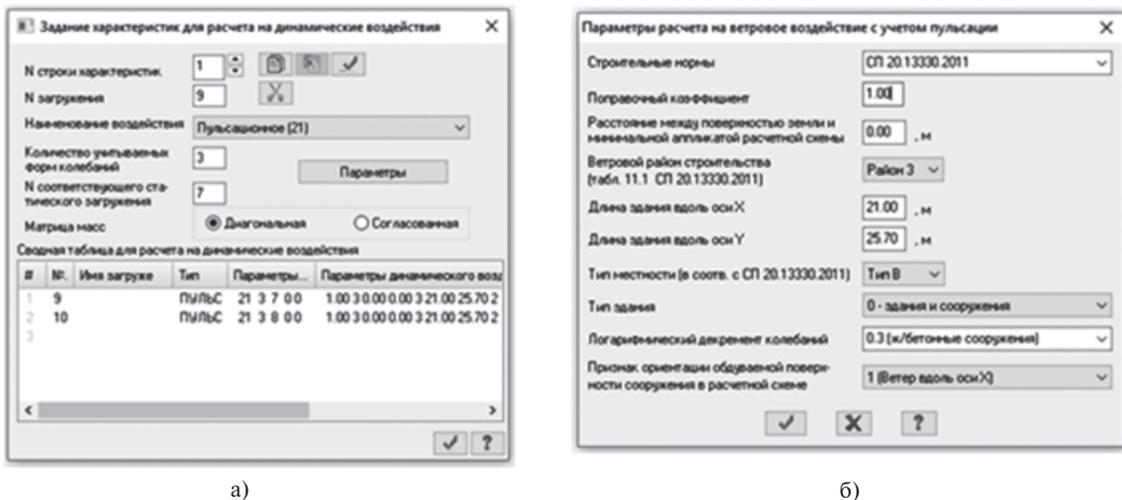


Рис. 4. Исходные данные для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки: а) основные характеристики; б) дополнительные параметры расчета

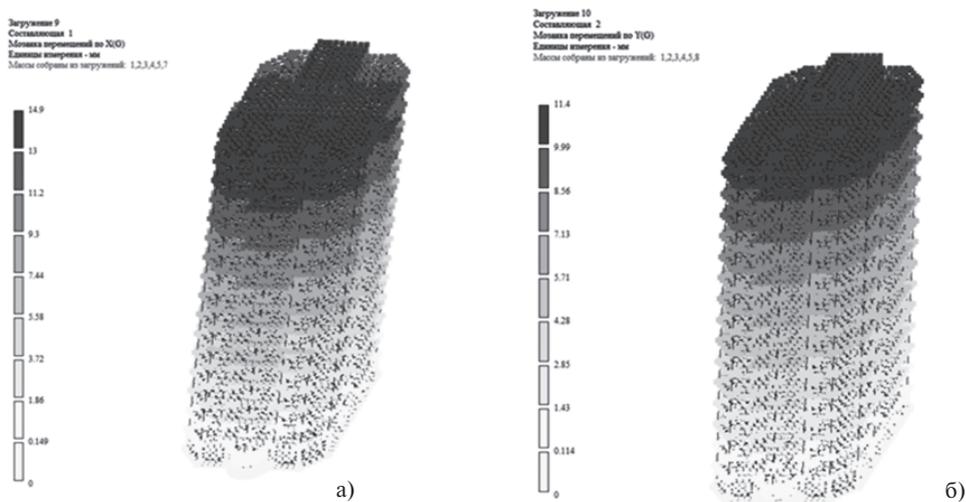


Рис. 5. Горизонтальные перемещения: а) по оси X; б) по оси Y

плит перекрытий и диафрагм жесткости. Результаты динамического расчета представлены в табл. 2 и демонстрируют изменение динамических параметров по трем главным формам колебаний каждого варианта моделирования.

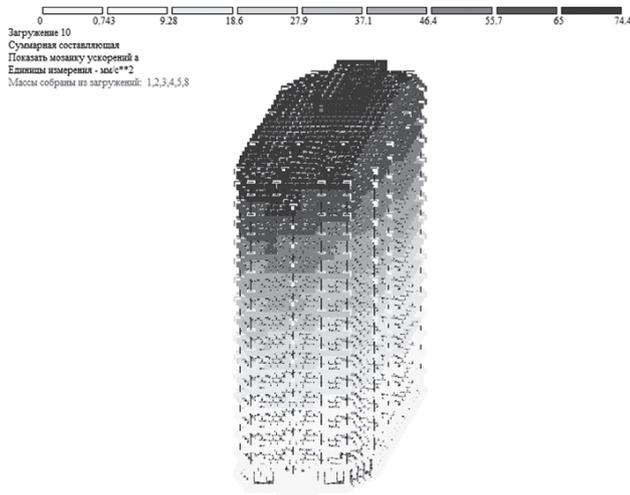


Рис. 6. Суммарные максимальные ускорения

В результате анализа динамических характеристик выявлен оптимальный вариант моделирования конструктивного решения каркаса здания (вариант № 1).

Динамические расчеты каркаса здания позволяют подтвердить не только правильность и экономичность конструктивных решений, но и определить динамическую комфортность верхних этажей многоэтажных зданий. При превышении допустимой нормативной величины максимального ускорения необходимо откорректировать конструктивную схему каркаса здания. Следует отметить, что регулирование динамических характеристик способом изменения жесткостных параметров элементов каркаса является неэффективным для зданий высотой до 75 м. В таких случаях необходимо варьировать расстановку диафрагм жесткости в соответствии с центром тяжести сооружения и использовать способ изменения расположения сосредоточенных масс.

Таблица 2

Регулирование динамических характеристик

Вариант моделирования	Геометрические характеристики элементов каркаса	Форма колебаний	Частота	Период	Ускорение
			Гц	с	мм/с ²
1	Плиты перекрытий толщиной 220 мм, диафрагмы жесткости толщиной 200 мм	1	0,59	1,69	74,6
		2	0,75	1,34	
		3	0,98	1,02	
2	Плиты перекрытий толщиной 220 мм, диафрагмы жесткости толщиной 250 мм	1	0,64	1,56	73,7
		2	0,81	1,23	
		3	1,07	0,93	
3	Плиты перекрытий толщиной 220 мм, диафрагмы жесткости толщиной 300 мм	1	0,68	1,47	72,3
		2	0,87	1,15	
		3	1,16	0,86	
4	Плиты перекрытий толщиной 230 мм, диафрагмы жесткости толщиной 300 мм	1	0,69	1,45	71,9
		2	0,88	1,14	
		3	1,17	0,86	

Литература

1. Кравченко Г.М. Динамический расчет объекта «Спортивно-оздоровительный комплекс» Технопарка РГСУ [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Е.О. Шутенко, К.Н. Хашхожев // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4. — URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3279/
2. Кадисов Г.М. Динамика и устойчивость сооружений [Текст] / Г.М. Кадисов. — М.: АСВ, 2007. — 272 с.
3. Масленников А.М. Основы динамики и устойчивости сооружений [Текст] / А.М. Масленников. — М.: АСВ, 2000. — 201 с.
4. Raymond W. Clough, Joseph Penzien. Dynamics of Structures // New York: McGraw-Hill, c1993. pp. 129–133.
5. Зотова Е.В. Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульс-

- ные воздействия [Текст] / Е.В. Зотова, Л.Н. Панасюк // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 3. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/
6. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — Т. 42. — № 3. — С. 8–15.
 7. Кравченко Г.М. Учет пульсации ветра при расчете зданий с несущими кирпичными стенами [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Научное обозрение. — 2014. — № 11-3. — С. 796–799.
 8. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, А.С. Осадчий, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — Т. 44. — № 2. — С. 8–17.
 9. Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования [Текст] / В.В. Зырянов // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707/

References

1. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Shutenko E.O., Khashkhozhev K.N. Dinamicheskiy raschet ob"ekta «Sportivno-ozdorovitel'nyy kompleks» Tekhnoparka RGSU [Dynamic calculation of the object "Sports and fitness complex" of the RGSU Technopark]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, I. 4. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3279/
2. Kadisov G.M. *Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy* [Dynamics and stability of structures]. Moscow, ASV Publ., 2007. 272 p.
3. Maslennikov A.M. *Osnovy dinamiki i ustoychivosti sooruzheniy* [Fundamentals of the dynamics and stability of structures]. Moscow, ASV Publ., 2000. 201 p.
4. Raymond W. Clough, Joseph Penzien. *Dynamics of Structures* // New York: McGraw-Hill, c1993. pp. 129–133.
5. Zotova E. V., Panasyuk L. N. Chislennoe modelirovanie dinamicheskikh sistem s bol'shim chislom stepeney svobody na impul'snye vozdeystviya [Numerical modeling of dynamic systems with a large number of degrees of freedom on impulse effects]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2012, I. 3. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/
6. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulirovanie parametrov sobstvennykh kolebaniy prostranstvennogo karkasa zdaniya [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, V. 42, I. 3, pp. 8–15.
7. Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Uchet pul'satsii vetra pri raschete zdaniy s nesushchimi kirpichnymi stenami [Accounting for the wind ripple in the calculation of buildings with bearing brick walls]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2014, I. 11-3, pp. 796–799.
8. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchiy A.S., Trufanova E.V. Raschet zdaniy slozhnoy geometricheskoy formy na vetrovye vozdeystviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2017, V. 44, I. 2, pp. 8–17.
9. Zyryanov V.V. Metody otsenki adekvatnosti rezul'tatov modelirovaniya [Methods for assessing the adequacy of the simulation results]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2013, I. 2. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707/